

**B1 - CABLES**

**PRECAUCIONES Y CONSIDERACIONES PARA LA EJECUCION DE ENSAYOS IN SITU EN CABLES DE MEDIA TENSIÓN DE AISLAMIENTO XLPE**

**R.E. ALVAREZ\***  
**IITREE-LAT**  
**FI-UNLP**  
**Argentina**

**H. MAYORA**  
**IITREE-LAT**  
**FI-UNLP**  
**Argentina**

**L.J. CATALANO**  
**IITREE-LAT**  
**FI-UNLP**  
**Argentina**

**P. MORCELLE DEL VALLE**  
**IITREE-LAT**  
**FI-UNLP**  
**Argentina**

**E. CALO**  
**IITREE-LAT**  
**FI-UNLP**  
**Argentina**

**Resumen** – Una vez que los cables son tendidos, previo a su energización resulta importante verificar el estado del mismo, especialmente su aislamiento, ya que con ello se puede verificar la calidad del tendido. Algo similar ocurriría en el caso de un cable que, al cabo de una falla, la misma fue reparada y previo a su reposición es fundamental verificar la efectividad de dicha acción correctiva. En este sentido, los ensayos juegan un rol esencial, siendo los ensayos de tensión resistida los más comunes y fáciles de realizar. Para ello, tradicionalmente se han aplicado tensiones continuas, por su facilidad y practicidad en lo que respecta al instrumental requerido, no obstante, en el caso de los cables de aislamiento XLPE la tensión continua puede ser nociva para el estado integral del aislamiento. Las nuevas normas recomiendan la aplicación de nuevas técnicas de pruebas como VLF (tensión de baja frecuencia). Sin embargo, a partir de un relevamiento realizado, dichas técnicas no son de amplia difusión en nuestra región, en especial por las empresas distribuidoras que operan redes de MT. En el presente trabajo, se presentan las recomendaciones y requerimientos normalizados, las prácticas y metodologías que se están difundiendo entres las compañías distribuidoras. Se desarrollan los conceptos de la relación entre los árboles de agua (y eléctricos) con el fenómeno de carga atrapada y los ensayos con tensiones continuas.

**Palabras clave:** Cable – Ensayo – Tensión – VLF – Fallas – Resistida

## **1 INTRODUCCIÓN**

Las redes subterráneas de media tensión son parte crítica y fundamental en los sistemas de distribución de energía eléctrica, tanto comerciales como industriales. Se caracterizan entre otros aspectos, por su estado de carga diverso y por su criticidad operativa, especialmente en los sistemas industriales donde no se dispone de redes de redundancia.

Tecnológicamente la gran mayoría de cables subterráneos actualmente empleados son de aislamientos reticulados (especialmente el polietileno reticulado, XLPE). No obstante, en muchas redes de distribución comerciales, coexisten cables con aislamientos reticulados con los laminados o de papel impregnado. Para vincular este tipo de cables, se utilizan empalmes de transición especialmente diseñados para este tipo de aplicaciones.

Al cabo de la instalación de un nuevo cable es necesario verificar el estado del mismo al cabo de la instalación y, además, que los accesorios (empalmes y terminales) han sido ejecutados en forma correcta.

Durante las condiciones operativas los cables y accesorios pueden experimentar fallos intempestivos para los cuales muchas veces es necesario recurrir a las técnicas de localización de fallas, aplicando diferentes metodologías, como por ejemplo la reflectometría. Una vez ubicada y reparada la falla, resulta imprescindible verificar el estado de la red previo a su energización, de forma de asegurar que la acción correctiva adoptada

ha sido apropiada. Por lo tanto, los ensayos sobre los cables tienen un rol esencial para la adecuada toma de decisiones operativas.

## 2 ENSAYO DE TENSIÓN RESISTIDA

Tanto para cables nuevos como para reparaciones de redes existentes, las verificaciones empleadas antes de las puestas en servicio consisten en controles y ensayos específicos, siendo el de tensión resistida uno de los más críticos e importantes.

Este ensayo se caracteriza por aplicar un potencial eléctrico de elevado valor durante un tiempo prescrito, con el fin de verificar la soportabilidad del sistema dieléctrico del cable y sus accesorios. Uno de los objetivos del ensayo es el de exponer los puntos débiles del conjunto cable/accesorios y que fallen durante una aplicación tensión de prueba, en lugar de fallar mientras están en servicio.

IEC [1] define como tensión resistida al valor de la tensión de ensayo que ha de aplicarse bajo unas condiciones especificadas, durante el cual para el caso de cables, no deben producirse descargas disruptivas por tratarse de un aislamiento no autorregenerativo. El valor de la tensión resistida es normalmente “ $n$ ” veces mayor que la tensión monofásica máxima nominal ( $U_0$ ) de los cables, dependiendo que norma o recomendación que se aplique.

## 3 TIPOS DE EXCITACIONES

En el campo de aplicación de cables, el ensayo de tensión resistida puede realizarse con diferentes tipos de excitaciones: Corriente Alterna (CA), Corriente Continua (CC), tensión de baja frecuencia (VLF) y oscilante. En la Tabla I se presentan los ensayos de tensión resistida indicando las principales ventajas y desventajas de cada uno de ellos [2].

**Tabla I - TIPOS EXCITACIONES PARA ENSAYOS DE TENSIÓN RESISTIDA EN CABLES DE MT**

Tipo de excitación	Ventaja	Desventaja
Corriente alterna de frecuencia industrial de la red (50/60 Hz)	Si la fuente a utilizar es la propia red, no se necesita equipamiento adicional por lo que resulta simple de implementar la prueba de puesta en servicio o de mantenimiento a $U_0$ . Se pueden ensayar longitudes largas.	No se puede probar a tensiones más elevadas que la tensión nominal $U_0$ . Detecta sólo los defectos obvios. La falla durante la prueba implica una corriente de falla en el sistema.
Corriente alterna de una fuente de ensayo a frecuencia industrial (50/60 Hz)	Este tipo de ensayo requiere de una fuente externa de corriente alterna, normalmente conformada por un transformador de alta tensión. Permite aplicar la tensión de ensayo resistida ( $n$ veces $U_0$ )	Considerando la elevada capacitancia de los cables, la potencia de la fuente debería ser considerable, lo cual implica equipamiento de elevado peso y volumen que hace que esta prueba resulte poco practicable, aún para cortas distancias de cables.
Corriente continua	El equipamiento de ensayo es compacto y normalmente de poco volumen (en comparación a los de CA) y fácil de manejar y transportar. Se pueden probar longitudes largas. <i>Nota: este ensayo suele denominarse ensayo de “Hi-Pot” (“High Potential”).</i>	La aplicación de una CC sobre un cable reticulado genera el mecanismo de cargas atrapadas, que aceleran las fallas en los cables con aislamientos envejecidos. No reproduce las condiciones de sollicitación que están presentes bajo una tensión de operación normal. No hay evidencia de que proporcione beneficios significativos para los cables con aislamiento extruido.
Sinusoidal de muy baja frecuencia (Very Low Frequency, VLF 0,01 a 1 Hz)	El equipamiento de ensayo es compacto, fácil de manejar y transportar. La forma de onda de la tensión de prueba es la misma que la forma de onda de la tensión de operación.	No reproduce la frecuencia de tensión de las pruebas de aceptación (fábrica) o de operación. Las longitudes de cable más largas requieren reducir la frecuencia o la tensión (entre 0,01 a 1 Hz).
Coseno rectangular de muy baja frecuencia (Very Low Frequency, VLF 0.1 Hz)	El equipo es pequeño y fácil de manejar. Pueden ensayarse longitudes mayores a 0,1 Hz que VLF sinusoidal para el mismo tamaño del instrumental de prueba.	Los períodos de tensión de CC elevados que se invierten en cada ciclo aumentan las probabilidades de la formación de carga atrapada. No reproduce la frecuencia ni forma de onda de tensión de operación.
Sistema resonante (10 a 300 Hz)	La frecuencia de la tensión de prueba es cercana a la frecuencia de la tensión del sistema. Permite la aplicación de tensiones de prueba por encima de la tensión de operación.	El equipo de prueba es grande, pesado, costoso y complejo. El tamaño del equipamiento de prueba limita la accesibilidad para las conexiones de los ensayos.

## 4 ASPECTOS NORMATIVOS

Al igual que la mayoría de los equipos eléctricos, con los cables de media tensión las normas internacionales de mayor aplicación y reconocimiento son las de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) y las del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE). No obstante, existen otras normas y recomendaciones que tienen determinada difusión en los ensayos de cables en el servicio. A continuación, se resumen los principales aspectos de las normas de mayor reconocimiento en la materia.

### 4.1 IEC 60502-2

La norma IEC 60502-2 [3] especifica la construcción, las dimensiones y los requisitos de prueba de los cables de potencia con aislamiento sólido extruido desde 6 hasta 30 kV para instalaciones fijas tales como redes de distribución o instalaciones industriales.

Se indican cuáles son los ensayos que se realizan luego del tendido de los cables. Al respecto, se establece que resulta recomendable realizar la prueba en la cubierta (chaqueta) del cable con CC acuerdo y que, si es necesario, se puede ejecutar una prueba en el aislamiento principal del cable. Al respecto se indica que, por acuerdo entre el comprador/propietario y el contratista/instalador, se puede realizar una de las siguientes pruebas CA:

- a) *Aplicar la tensión de ensayo correspondiente al valor fase a fase del cable/instalación, durante 15 minutos a una frecuencia de entre 20 a 300 Hz entre el conductor y la pantalla/cubierta metálica.*
- b) *Aplicar al cable la tensión nominal normal  $U_0$  del sistema durante 24 h.*
- c) *Aplicar el valor de tensión eficaz de  $3 U_0$  a una frecuencia de 0,1 Hz durante 15 minutos entre el conductor y la pantalla/cubierta metálica.*

Se indica que, en cualquiera de estas tres metodologías, durante la aplicación de la tensión pueden monitorearse los valores de la  $\tan \delta$  y/o las descargas parciales.

Esta norma señala que como alternativa a las pruebas CA, se puede hacer un ensayo con CC aplicando una tensión de prueba de  $4 U_0$  durante 15 minutos. No obstante, se remarca que la prueba de CC puede poner en peligro el sistema de aislamiento ensayado, por lo tanto, siempre que sea posible deben aplicarse algunos de las metodologías de CA.

Se aclara que, tanto sea para el ensayo con tensión alterna como continua, si los cables a ensayar han estado en uso, se pueden usar tensiones más bajas y/o tiempos de aplicación más cortos. Los valores deben adoptarse considerando la antigüedad, el entorno, el historial de averías y el objetivo de las pruebas.

### 4.2 IEEE 400-1

La norma IEEE Std. 400-1 [4] es una guía para la realización de ensayos en cables con aislamientos laminados (no extruidos) que se encuentran instalados. Indica las prácticas recomendadas y los procedimientos para la aceptación de los ensayos aplicando tensiones continuas exclusivamente. La norma está orientada a pruebas de cables instalados a partir de  $U_0 = 5$  kV, y aplica para los siguientes casos:

- a) *Cables nuevos, en los cuales luego del tendido es necesario verificar el estado previo a su energización.*
- b) *Cables ya en el servicio, en los cuales, luego de haber efectuado la reparación de alguna falla, es necesario verificar el estado del mismo previo a su re-energización.*

La norma, además de indicar las precauciones y las características principales de los equipos a usar, establece los niveles de tensión y los tiempos de ensayo a aplicar para cada caso.

El Anexo C esta norma trata sobre las diversas visiones que existen respecto a las pruebas de CC y CA. Se menciona que pruebas realizadas con CC en forma no adecuada pueden dar una falsa indicación y hasta pueden dañar la condición del aislamiento del cable.

### 4.3 IEEE 400-2

La norma IEEE Std. 400-2 [5] es una guía que describe los métodos y las prácticas que se utilizan en la realización de ensayos con tensión de VLF para probar la condición del aislamiento de cables instalados (nuevos o en servicio) de tensiones nominales de entre de 5 a 69 kV, ya sean laminados o extruidos. Se indica que la frecuencia de prueba de VLF más común es de 0,1 Hz. Se establecen las tensiones recomendadas de ensayo para probar cables luego de la instalación y durante el mantenimiento.

Se destaca que esta norma señala que las pruebas de CC de alta tensión eliminan el problema de las elevadas corrientes de carga capacitivas que aparecen en las pruebas de CA, pero éstas no someten al sistema de aislamiento del cable a la misma distribución de tensión a la que está expuesto en condiciones normales de funcionamiento. Además, indica que existen importantes efectos negativos sobre el aislamiento de los cables de XLPE con algún tiempo en el servicio, al energizar con la tensión de red, cuando previamente se habían realizado pruebas de CC de alta tensión. También indica que la CC no es efectiva para detectar algunos tipos de defectos graves que podrían ser detectados con los ensayos de VLF o de CA.

#### **4.4 UNE 211006 (Ensayos con VLF y CA)**

La norma española UNE 211006-2010 [6] especifica las pruebas y ensayos a realizar en cables una vez terminada su instalación y previos a la puesta en servicio. Los cables considerados en esta norma tienen una tensión asignada  $U_0/U$  ( $U_m$ ) superior a 0,6/1 kV. Se establece que se debe utilizarse, al menos, uno de los métodos de ensayo en CA siguientes:

- a) *Ensayo de tensión soportada a frecuencia industrial: aplicando entre conductor y pantalla una tensión de CA de  $\sqrt{3}U_0$  entre 20 Hz y 300 Hz, durante 15 min.*
- b) *Ensayo de tensión soportada a muy baja frecuencia: aplicando una tensión de CA de  $3U_0$  y 0,1 Hz entre conductor y la pantalla, durante 15 min.*
- c) *Ensayo de tensión soportada a onda oscilante: aplicando entre conductor y la pantalla una tensión de onda oscilante de entre 20 Hz y 300 Hz de valor de cresta  $\sqrt{2} \sqrt{3} U_0$ .*
- d) *Medición de descargas parciales*

En caso de no poder realizarse ninguno de los métodos anteriormente descritos, la norma establece que se debe someter al cable a la tensión de servicio durante 24 h (sin carga).

#### **4.5 ANSI/NETA ATS**

La norma ANSI/NETA ATS-2017 [7] especifica las pruebas e inspecciones de campo recomendadas para la aceptación de los equipos y de los sistemas de energía eléctrica. La norma tiene como principal objetivo asegurar que los equipos y los sistemas eléctricos ensayados sean operables dentro de los estándares aplicables y de las tolerancias de los fabricantes, y que se instalen de acuerdo con las especificaciones de diseño.

Se indican que las pruebas eléctricas a realizar en cables de media tensión se hacen con excitaciones de CC, AC o VLF. Se destaca que esta norma no diferencia entre cables extruidos o laminados ni indica la duración de las pruebas, pero se refiere a las normas ANSI/ICEA S93-639 [8] y ANSI/ICEA S-94-649 [9]. Estas dos normas advierten que aplicar tensiones de CC a los cables XLPE es perjudicial para el aislamiento y la vida útil del cable debido al efecto de “carga atrapada”.

### **5 EJEMPLOS DE PRÁCTICAS ADOPTADAS**

En la Tabla II se presenta un resumen de un relevamiento realizado en los procedimientos de ensayo con tensión sobre cables en compañías distribuidoras de servicio eléctrico de diferentes partes del mundo. En el campo “País (tensión)”, se indica el país de la empresa y entre paréntesis la tensión nominal de los cables.

Del resumen de procedimientos relevados, se observa que compañías distribuidoras de diferentes países de referencia emplean, en la mayoría de los casos excitaciones de CA/VLF para ensayar cables en el servicio, restringiendo las excitaciones de CC a casos excepcionales.

### **6 ARBORESCENCIAS Y CARGA ATRAPADA EN CABLES DE XLPE**

#### **6.1. Arborescencias de agua y arborescencias eléctricas**

Las arborescencias de agua se inician y crecen en la mayoría de los aislamientos poliméricos expuestos a un campo eléctrico de CA y a un cierto nivel de humedad relativa (típicamente superior al 75%) [10]. Este tipo de arborescencias son estructuras similares a ramificaciones de árboles que consisten en pequeños surcos o hileras de vacíos, especialmente cuando se acercan al conductor interno.

El diámetro de estos huecos puede variar desde 0,1 a 5  $\mu\text{m}$ , y pueden producirse separaciones relativamente grandes entre ellos [11].

**Tabla II.** EJEMPLOS DE PRÁCTICAS MUNDIALES ADOPTADAS PARA ENSAYOS DE CABLES DE MT

País (tensión)	Cables nuevos		Cables en servicio	
	Excitación	Tensiones	Fuente	Tensiones
Alemania (11 kV)	VLF + DDPP	3 U <sub>0</sub> @ 30/60 min	VLF	1,7 a 3 U <sub>0</sub> @ 60 min
Australia A (11 kV)	CC, VLF, CA (CC sólo a cables impregnados)	VLF: 17,5 kV @ 15 min CA: 15 kV @ 5 min	CC, VLF, CA (CC sólo a cables impregnados)	VLF: 12,5 kV @ 15 min CA: 12 kV @ 5 min
Australia B (11 kV)	CC, VLF, CA (excepcionalmente CC)	CC: 25 kV @ 15 min VLF: 19 kV @ 30 min CA: 28 kV @ 1min o 16 kV @ 15 min	CC, VLF, CA (excepcionalmente CC)	CC: 19 kV @ 1 min VLF: 19 kV @ 1 min CA: 14 kV @ 1min
España A (12 kV)	VLF	3 U <sub>0</sub> @ 30 min	VLF	3 U <sub>0</sub> @ 30 min
España B (12 kV)	CA, Oscilante, VLF	CA: 21 kV @ 15 min Oscilante: 29,4 kV	CA, Oscilante, VLF	CA: 21 kV @ 15 min Oscilante: 29,4 kV
Holanda (11 kV)	VLF + DDPP	3 U <sub>0</sub> @ 30/60 min	VLF	1,7 a 3 U <sub>0</sub> @ 60 min
Reino Unido A (11 kV)	CC, VLF	CC: 5 kV @ 1 min VLF: 1,5 U <sub>0</sub> @ 15 min	CC, VLF	CC: 5 kV @ 1 min VLF: 1,5 U <sub>0</sub> @ 15 min
Reino Unido B (11 kV)	VLF	2,5 U <sub>0</sub> @ 30 min	VLF	2,5 U <sub>0</sub> @ 30 min
USA (13 kV)	CC, VLF (excepcionalmente CC)	15 kV @ 5 min (en condiciones de emergencia) 15 kV @ 30 min	CC, VLF (excepcionalmente CC)	15 kV @ 5 min 15 kV @ 30 min

*Nota: “DDPP”: medición de las descargas parciales, “@”: durante*

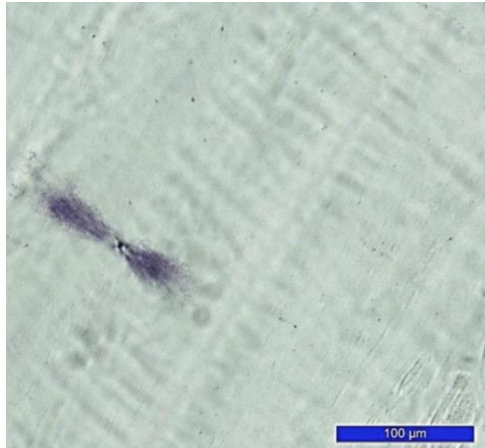
Cuando la humedad llega a la superficie interna (a través del conductor principal) o externa (a través de la cubierta y pantalla) puede ingresar a las ramificaciones conformando de esta forma, pistas hidrofóbicas en el seno del aislamiento.

Está bien establecido que la humedad penetra en los polímeros y que la CA “mueve” la humedad hacia los puntos de mayor concentración de campo eléctrico, efecto conocido como “dielectrophoresis” [12]. Una de las técnicas para la detección de los árboles, consiste en tomar muestras de aislamiento del cable, someterla a tinturas especiales e inspeccionarlas mediante microscopía óptica [13]. En las Fig. 1 y Fig. 2 se muestran las imágenes de dos micrografías en las cuales se aprecian una de las variantes de árboles de humedad detectadas en un cable de 13,2 kV, denominada “moño”.

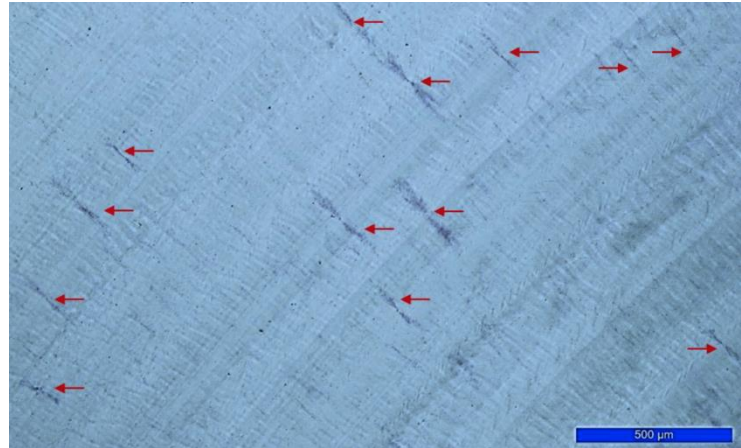
Las arborescencias de agua generalmente son más conductivas que el propio aislamiento debido a la presencia de elementos polares (agua y contaminantes iónicos). La conductividad de las arborescencias de agua tiende a aumentar con el tiempo.

En los aislamientos sólidos también existe un mecanismo de degradación muy crítico conocido como arborescencias eléctricas, consistentes en ramificaciones que ocurren en zonas puntuales de alta intensidad de campo eléctrico y que es seguido por el proceso de descargas parciales. La ruptura del aislamiento bajo la influencia de arborescencias eléctricas a veces sólo es cuestión de minutos u horas [14].

Las arborescencias de agua se pueden transformar o generar arborescencias eléctricas [15]. Por ejemplo, cuando la intensidad del campo eléctrico genera descargas parciales en las puntas de las ramificaciones de humedad, se da la formación de arborescencias eléctricas.



**Fig. 1.** Micrografías ópticas (200x) donde se aprecia un árbol de humedad tipo “moño” en aislamiento XLPE (escala 100 µm)



**Fig. 2.** Micrografía óptica (50x) de un aislamiento XLPE. Se observan numerosos árboles de agua del tipo “moño” (señalados con flechas rojas) en la dirección radial al espesor del aislamiento. (escala 500 µm)

Está comprobado que las sobretensiones y las tensiones de CC pueden crear arborescencias eléctricas [12]. Considerando estos mecanismos, la falla eléctrica en aislamiento interno de un cable ocurre generalmente cuando:

- a) *Una arborescencia eléctrica que se inicia desde una arborescencia de agua y cortocircuita parcialmente el aislamiento. Formado el árbol eléctrico, se inicia la actividad de descargas parciales lo que provoca a lo largo del tiempo que los canales o ramificaciones crezcan “acortando” aún más la sección del aislamiento y como resultado se produzca una falla del cable. Los árboles eléctricos inducidos generados desde sobretensiones transitorias pueden necesitar meses para descomponerse y generar la falla. Una forma de prolongar la vida útil del aislamiento es limitar la magnitud de las tensiones transitorias [11].*
- b) *Se desarrolla una falla térmica cuando un árbol de agua en el aislamiento alcanza una conductividad suficientemente alta. Si un árbol de agua se desarrolla a lo largo del aislamiento, su conductividad generalmente aumentará con el tiempo, creciendo la corriente de conducción hasta generar calentamientos locales, lo que desencadena una falla en un determinado tiempo [11].*

Ambos mecanismos dependerán del gradiente de campo eléctrico en el cable, parámetro que a su vez depende del espesor del aislamiento. Para cables de más baja tensión, los árboles de agua o eléctricos pueden puentear el aislamiento de modo que la falla puede producirse por cualquiera de los dos mecanismos. Por otra parte, para los cables de mayor tensión ( $> 20$  kV) resultan más probables las fallas por arborescencias eléctricas generadas a partir de arborescencias de agua [11].

## 6.2. Efecto de carga atrapada

Cuando un aislamiento es sometido a una prueba de tensión con CC se produce sobre el material dieléctrico un proceso de polarización (distribución de cargas), que se considera constante dentro del volumen del mismo aislante. Sin embargo, en materiales como el XLPE, al aplicar un campo eléctrico continuo, se produce la formación de cargas iónicas producto de la disociación molecular del material dieléctrico [16]. Las cadenas de carbono que conforman el XLPE poseen una fase cristalina (en la cual todas las cadenas que la componen están altamente organizadas) y una fase amorfa que es estructuralmente desorganizada. La carga almacenada bajo la acción de un campo eléctrico continuo en la interfaz micro-estructural amorfo-cristalina del material, es precisamente lo que se conoce como “carga atrapada” o “carga espacial”. El valor de la tensión residual generada por la carga atrapada depende de las características del material dieléctrico.

Por otra parte, en estas regiones amorfas-cristalinas se acumulan aditivos, como impurezas y antioxidantes, lo cual tiene un efecto importante en la formación de carga espacial [12]. Se ha comprobado que la acumulación de carga espacial es mayor en la región central del aislamiento para el caso de los aislamientos envejecidos y en interfaces del aislamiento de accesorios, por ejemplo, empalmes [15]. Luego, si en estas regiones de acumulación de carga, además se tiene la presencia de arborescencias de humedad, entonces se propicia aún más fácilmente la formación de arborescencias eléctricas. Por lo tanto, cuando al sistema de aislamiento se lo somete a sobretensiones transitorias, estos puntos débiles del sistema de aislamiento (arborescencias de agua

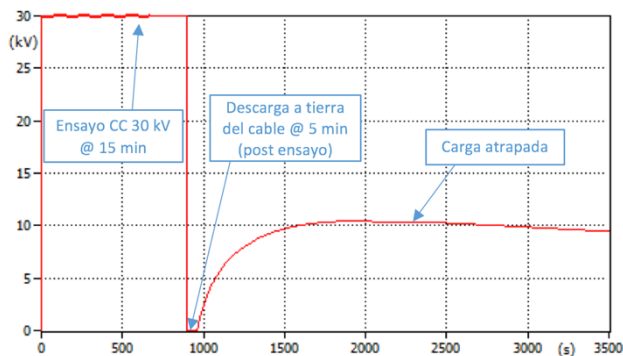


y eléctricas + carga atrapada) conformarán probables caminos críticos para desencadenar fallas (eléctrica o térmica).

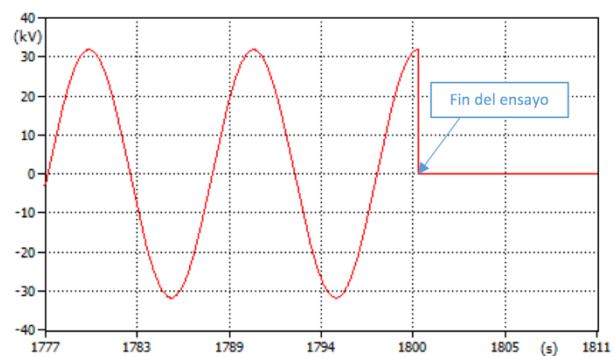
### 6.3. Relación entre arborescencias, ensayos de CC y carga atrapada

En la Fig. 3 se presenta el resultado de un modelo de cable en XLPE de  $U_0=13,2/\sqrt{3}$  desarrollado con ATP para estudiar el efecto de la carga atrapada. Si bien dicho modelo no es el objeto del presente trabajo, se presenta el resultado que se obtiene al aterrizar el cable durante un cierto tiempo al cabo del ensayo con tensión resistida de CC (el cual consistió en aplicar 30 kV durante 15 minutos). Como puede apreciarse, al remover dicha conexión el aislamiento comienza nuevamente polarizarse para luego despolarizarse, con constantes de tiempo que dependen de la tensión de prueba aplicada y del tipo y estado del cable. De ello surge que, al energizar un cable con carga atrapada en su aislamiento, se podrían producir sobretensiones localizadas que solicitan el aislamiento pudiendo generarse una falla directa.

En la Fig. 4 se presenta el modelo del mismo cable, pero con el resultado de un ensayo de VLF (30 kV de 0,1 Hz durante 30 minutos). Como se aprecia en el resultado, el ensayo de VLF no genera efecto de carga atrapada.

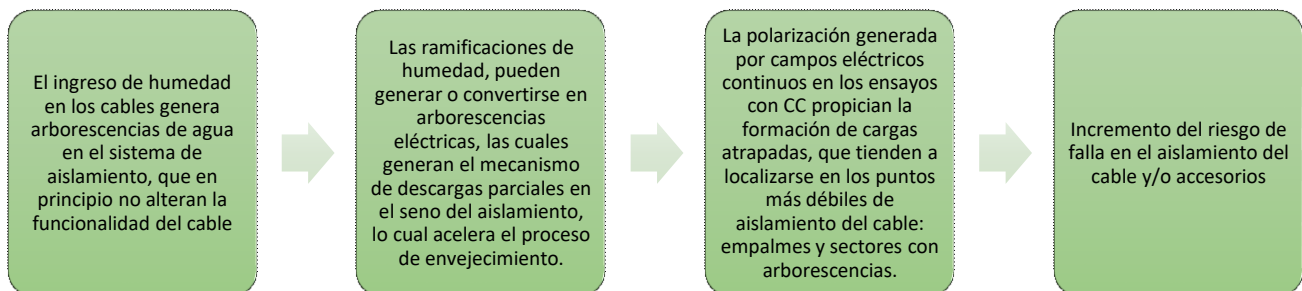


**Fig. 3.** Ensayo de CC (30 kV@ 15 min) y efecto de la carga atrapada en un cable de 13,2 kV (modelo con ATP)



**Fig. 4.** Ensayo de VLF (30 kV@ 30 min) en un cable de 13,2 kV (modelo con ATP)

Cuando un cable de XLPE en el que ingresa humedad al sistema de aislamiento y además está expuesto a sobretensiones en condiciones de servicio, se podrían generar ramificaciones de diferentes características que provocan envejecimiento con el incremento del riesgo de falla. Si a dicho cable con humedad, además, se lo somete a una prueba de tensión resistida de CC, se generarán cargas atrapadas que se localizarán en los puntos más débiles del cable (ramificaciones). Luego, si la carga atrapada no se extingue eficazmente, las zonas débiles (ahora con carga atrapada) estarán más solicitadas durante la energización del cable, lo cual acelera, aún más, el proceso de envejecimiento del aislamiento y con ello la reducción de la vida del cable. A partir de ello, se propone la secuencia presentada en la Fig. 5.



**Fig. 5.** Secuencia y relación entre la humedad, arborescencias y carga atrapada en el aislamiento de un cable de XLPE

## 7 CONCLUSIONES

La humedad propicia la formación de arborescencias de humedad cuyo crecimiento en condiciones de servicio es un proceso muy lento, que suele tomar muchos años para penetrar por completo el aislamiento. Sin embargo, las arborescencias de humedad pueden transformarse en arborescencias eléctricas las que crecen rápidamente como para provocar la falla total del aislamiento.

Los ensayos de tensión resistida previos a la energización de una red subterránea de media tensión resultan fundamentales para garantizar la seguridad operativa y detectar los defectos severos que pudieran estar presentes en el sistema de aislamiento. A los fines del diagnóstico del aislamiento otros ensayos son más sensibles y brindan información sobre el estado dieléctrico ( $\tan\delta$ , descargas parciales, etc.).

El uso de CC para ensayos genera el mecanismo de carga atrapada en aislamientos de XLPE, que en conjunción con la presencia de arborescencias, conforman un punto débil en el cable, especialmente en las zonas de interface de aislamiento, es decir en empalmes y terminales. Si al cabo del ensayo de tensión resistida con CC no se elimina apropiadamente la carga atrapada, en el proceso de energización del cable el/los punto/s débil/es antes descripto/s estará/n más solicitados que en régimen normal, lo cual provoca un envejecimiento en el aislamiento que en el tiempo pueden desencadenar en una falla severa.

Las metodologías de ensayo con tensión de CA o VLF permiten evaluar el cable sin que se produzca la polarización del material dieléctrico y por lo tanto, su aplicación no genera el mecanismo carga atrapada.

Finalmente, la normativa internacional (especialmente IEC e IEEE) establece que las pruebas para cables en servicio de aislamiento XLPE sean con tensiones alternas y destacan evitar el uso de las pruebas con CC. En tal sentido, el relevamiento realizado de los procedimientos de compañías de distribución de diferentes países, indica que la metodología de ensayos de tensión resistida se está orientando a la ejecución de pruebas de CA o VLF, dejando los ensayos de CC, a lo sumo, para ocasiones especiales.

## 8 REFERENCIAS

- [1] IEC 60071-1:2011 “*Insulation co-ordination - Part 1: Definitions, principles and rules*”.
- [2] Georgia Institute of Technology (NEETRAC) “*Cable Diagnostic Focused Initiative (CDFI)*” Phase II, Released February 2016”.
- [3] IEC 60502-2:2014 “*Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ( $U_m = 1,2$  kV) up to 30 kV ( $U_m = 36$  kV) – Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ( $U_m = 7,2$  kV) up to 30 kV ( $U_m = 36$  kV)*”
- [4] IEEE Std. 400-1-2007 “*IEEE Guide for Field Testing of Laminated Dielectric, Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above with High Direct Current Voltage*”
- [5] IEEE Std. 400-2-2013 “*IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF) (less than 1 Hz)*”
- [6] UNE 211006-2010 “*Ensayos previos a la puesta en servicio de sistemas de cables eléctricos de alta tensión en corriente alterna*”
- [7] ANSI/NETA ATS-2017 “*Acceptance Testing Specifications for Electrical Power Distribution Equipment and Systems*”
- [8] ANSI/ICEA S93-639-2012 “*5-46kV Shielded Power Cable for Use in the Transmission and Distribution of Electric Energy*”
- [9] ICEA S-94-649-2013 “*Concentric Neutral Cables Rated 5 Through 46 kV*”
- [10] CIGRE Technical Brochure 493, “*Non-Destructive Water-Tree Detection in XLPE Cable Insulation*”. April 2012
- [11] S.M. Moody, V.A.A. Banks and A.S. Vaughan, “*A preliminary study of the relationship between matrix morphology and water treeing in medium voltage polymeric insulated cable*”, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP), pp. 352-360, October 20-23, Knoxville Tennessee, USA, 1991.
- [12] F.H. Kreuger, “*Industrial High De Voltage*”. Delft: Delft University Press. 1995
- [13] M. T. Shaw, S. H. Shaw “*Water Treeing in Solid Dielectrics*”, IEEE Transactions on Electrical Insulation. Volume: EI-19, pp 419 – 452, Issue: 5 , Oct. 1984.
- [14] Tobias Neier. “*Cable Diagnostic In MV Underground Cable Networks. Theoretical Background and Practical Application*”. Version: 3.0 02/2015
- [15] William A. Thue “*Electrical Power Cable Engineering*”. Marcel Dekker Inc. New York- Base. 1998
- [16] D. Fabiani, G. Montanari, C. Laurent, G. Teyssedre, P. Morshuis, R. Bodega, L. Dissado, A. Campus and U. Nilsson. “*Polymeric HVDC cable design and space charge accumulation. Part1: Insulation/semicon interface*”. IEEE Electrical Insulation Mag. Vol. 23, No. 6, pp 11-19, Dec 2007.